

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



JOSIP ŽIVKOVIĆ

SPARK COUNTER DETEKTOR ZRAČENJA

Diplomski rad

Osijek, 2018.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



JOSIP ŽIVKOVIĆ

SPARK COUNTER DETEKTOR ZRAČENJA

Diplomski rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

radi stjecanja akademskog naziva magistra edukacije fizike i informatike

Osijek, 2018.

„Ovaj diplomski rad izrađen je u Osijeku pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Vanje Radolića i sumentora Igora Miklavčića, pred. u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku“.

Sadržaj:

1. Uvod	1
2. Atomska jezgra	2
3. Otkriće radioaktivnosti	4
4. Radioaktivnost i radioaktivni raspadi	5
4.1 Alfa-raspad	7
4.2 Beta-raspad	8
4.3 Gama-zračenje.....	10
4.4 Radioaktivni nizovi.....	11
5. Ionizacijsko zračenje.....	11
6. Detektori zračenja	13
6.1 Plinski detektori.....	14
6.1.1 Ionizacijska komora	15
6.1.2 Proporcionalni brojač	17
6.1.3 Geiger – Mullerov brojač.....	18
6.1.4 Spark counter	19
7. Spark detektor	19
8. Izrada detektora	22
9. Konstrukcija Arduina	27
10. Testiranje detektora	29
11. Pokusi.....	31
12. Zaključak	37
13. Literatura	38
14. Životopis	40

SPARK COUNTER DETEKTOR ZRAČENJA

JOSIP ŽIVKOVIĆ

Sažetak

U uvodnom dijelu diplomskog rada opisani su radioaktivnost, tipovi radioaktivnosti, ionizacija tvari i osnovni principi detekcije radioaktivnog zračenja. Naglasak je stavljen na opis principa rada spark detektora koji detektiraju električne iskre kao posljedicu prolaska zračenja kroz određeno osjetljivo područje detektora. Glavni dio diplomskog rada daje detaljan opis svih faza dizajna, konstrukcije, testiranja i implementacije spark detektora. Detaljno su opisani neki pokusi koji se mogu iskoristiti u nastavi, kako bi se uočile, istražile i objasnile neke pojave i procesi vezani uz radioaktivnost i svojstva radioaktivnog zračenja, ionizaciju tvari i detekciju zračenja, a s ciljem njihova dubljeg razumijevanja kod učenika i studenata.

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: Spark detektor, radioaktivni izvor, radioaktivno zračenje, ionizacija

Mentor: izv. prof. dr. sc. Vanja Radolić

Sumentor: Igor Miklavčić, pred.

Rad prihvaćen:

SPARK COUNTER RADIATION DETECTOR

JOSIP ŽIVKOVIĆ

Abstract

The introductory part of the thesis describes radioactivity and its properties, ionization and basic principles of radiation detection. The emphasis is put on the description of the spark detectors and their detection of electrical sparks which occur due to passing of radiation through a particularly sensitive area of the detector. The main part of this paper gives a detailed description of all stages of design, construction, testing and implementation of a spark detector. A number of experiments suitable for in-class use are described in detail. They are significant for exploring and explaining certain phenomena and processes related to radioactivity, ionization and radiation detection, with the aim of enhancing the students' understanding of these subjects.

Thesis deposited in Department of Physics library

Key words: Spark detector, radioactive source, radioactive radiation, ionization

Supervisor: Vanja Radolić, Ph.D, Associate Professor

Co-supervisor: Igor Miklavčić, Lecturer

Thesis accepted:

1. Uvod

U prirodi postoje stabilne i nestabilne atomske jezgre. Nestabilne atomske jezgre se spontano raspadaju i prelaze u energijski stabilnija stanja tako da izbacuju bilo čestična zračenja (alfa, beta) i/ili fotonsko (gama) zračenje, odnosno energiju u obliku zračenja. Proces je poznat pod nazivom radioaktivnost, a zračenja koja raspadom nastaju zovemo radioaktivna zračenja i ona spadaju u grupu ionizirajućih zračenja.

Čovjek svojim osjetilima ne može osjetiti radioaktivno zračenje. Kako bi se otkrila i utvrdila osnovna svojstva ovih zračenja, potrebni su posebni uređaji – detektori. Radioaktivnost je otkrivena pomoću fotografske ploče te se stoga fotografska ploča može smatrati prvim detektorom zračenja. Od otkrića radioaktivnosti (1896. godine, Henri Becquerel) razvijene su mnoge tehnike detekcije prilagođene pojedinim vrstama zračenja.

Aktivna tvar u detektorima može biti bilo koja tvar koja pod utjecajem radioaktivnog zračenja primjetno mijenja svoja svojstva te se na tim učincima zasniva rad detektora. Različiti detektori mogu poslužiti za mjerenje različitih karakteristika zračenja.

Glavna mjerljiva karakteristika svih zračenja je energija odnosno informacija koja se dobiva jednostavnim brojanjem interakcije čestica zračenja s aktivnom tvari. Mnoštvo postojećih detektora zračenja moguće je klasificirati na razne načine, prema fizikalnim procesima na kojima se temelji njihov rad. U cijelom procesu detekcije zračenja razlikuju se tri etape:

- a) dospijeće zračenja na detektor
- b) djelovanje zračenja na materiju detektora
- c) pokazatelj detektiranog zračenja.

Zbog svojih specifičnih osobina radioaktivno zračenje nalazi primjene u mnogim područjima ljudskog djelovanja. Ono se koristi u medicini, biologiji, umjetnosti, arheologiji, proizvodnji energije, znanosti materijala, istraživanju svemira i okoliša. Kozmička zračenja, zračenja iz tla, ljudskih tijela kao i sve raznovrsnija uporaba zračenja bili su motiv koji me je zainteresirao da na Odjelu za fiziku u Osijeku konstruiram i testiram spark detektor.

2. Atomska jezgra

Još od davnih vremena ljudi istražuju od čega je izgrađen svijet koji ih okružuje. Sve što u prirodi postoji neovisno o ljudskoj spoznaji javlja se u dva oblika kao: materija (tvar i energija) i polje.

Polje je prostor u kojem se osjeća djelovanje neke sile (gravitacijske, elektromagnetske, nuklearne itd.). Preko fizikalnih polja ostvaruju se sva međudjelovanja u prirodi.

Pod pojmom tvar podrazumijevaju se sva tijela koja imaju masu (olovka, stol, zrak, molekule, atomi itd.). Kemijski su elementi najjednostavniji oblik postojanja tvari. Od njih je sastavljena elementarna tvar, dakle čista tvar koja se kemijskim putem ne može dalje rastaviti na jednostavnije tvari.

Atom je najmanja čestica koja posjeduje kemijske osobine elemenata, pa razlikujemo atome: vodika, ugljika, radija itd. Svaki kemijski element ima svoj naziv, koji najčešće potječe od grčkih ili latinskih naziva, a skraćeno ih prikazujemo njihovim kemijskim simbolima (vodik-H, ugljik-C, željezo-Fe, uranij-U, ...).

Elementarne čestice od kojih je sastavljen atom su: elektroni, protoni i neutroni. Atom se sastoji od pozitivno nabijene atomske jezgre (nukleusa) i negativno nabijenog elektronskog omotača u kojem se u točno određenim energijskim stanjima velikim brzinama gibaju elektroni.

Atomi su vrlo sitne čestice, a još sitnija jezgra sadrži gotovo svu masu atoma. Uz gusto složene atome razmak između jezgara desetke je tisuća puta veći od promjera jezgre, pa su tvari koje izgrađuju naš materijalni svijet gotovo šuplje.

Jezgre atoma razlikuju se po veličini, naboju i masi. Kako bi se razlikovale jezgre različitih atoma, uvedena su dva broja koja ih jednoznačno opisuju, to su redni broj (Z) i maseni broj (A) kao što je prikazano na Slici 1.

Redni, atomski ili protonski broj (Z) jednak je broju protona u atomskoj jezgri i određuje redni broj elementa u periodnom sustavu elemenata. Za električno neutralan atom broj protona u atomskoj jezgri jednak je broju orbitalnih elektrona. Maseni ili nukleonski broj (A) jednak je ukupnom broju protona i neutrona (nukleona) u jezgri atoma.



Slika 1. Kemijski element X

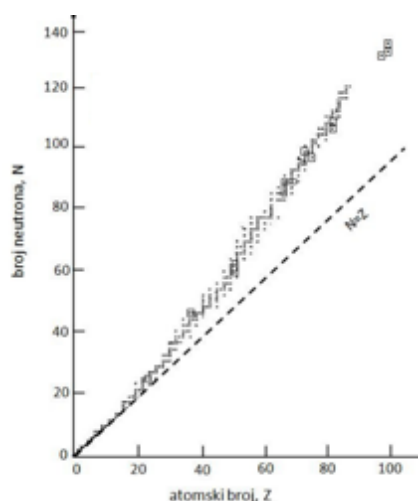
Proton je elementarna čestica pozitivnog elementarnog naboja, elektron negativnog elementarnog naboja dok je neutron elementarna čestica bez naboja [1].

Iako u unutrašnjosti atomske jezgre djeluju sve četiri osnovne sile: neznatna gravitacijska, odbojna električna među protonima i „slaba“ među nukleonima, dominantna je jaka nuklearna sila koja stabilne atomske jezgre drži na okupu. Nuklearna sila djeluje samo između najbližih susjeda. Kako raste broj protona u jezgri između kojih djeluje odbojna elektrostatska sila, da bi jezgra ostala stabilna, mora rasti i broj neutrona. Ako je omjer broja neutrona i protona odgovarajući, jezgra je stabilna, u protivnom se raspada u procesu radioaktivnosti. Osobine nuklearne sile su:

- djeluje među nukleonima
- neovisna je o naboju
- kratkog je dosega (manja od $2 \cdot 10^{-15}$ m) i
- veoma snažna.

Nuklearna sila dominira nad odbojnom električnom silom samo na udaljenostima između susjednih protona u jezgri. Nasuprot tome udaljeniji protoni "osjećaju" između sebe samo odbojnu električnu silu. Zato su za stabilnost jezgre potrebni neutroni. Kako bi neka jezgra bila stabilna, najvažnije je da ukupan broj neutrona (N) bude veći od ukupnog broja protona (Z), osobito ako se radi o težim elementima.

Stabilne se jezgre nalaze u uskom području oko zamišljene crte, tzv. linije stabilnosti kao što je prikazano na Slici 2. Može se vidjeti kako se na početku linija stabilnosti poklapa s pravcem $N = Z$, što znači da su u laganim stabilnim jezgrama brojevi protona i neutrona podjednaki. Za teže elemente taj omjer protona i neutrona, za stabilne jezgre, približava se omjeru 1,5 [2].



Slika 2. Krivulja stabilnosti jezgre

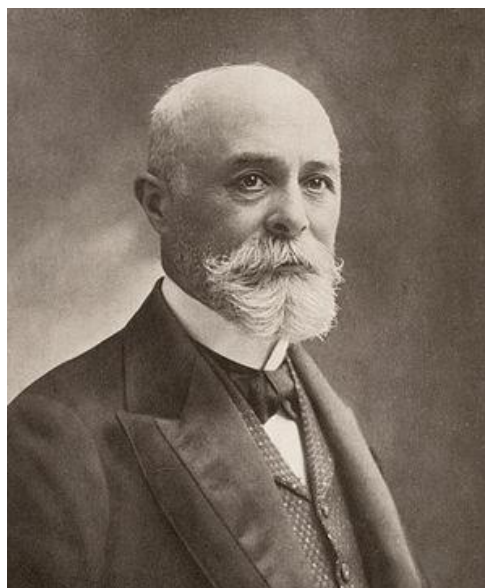
Linija stabilnosti završava s bizmutom $Z = 83$. Iznad 83 protona u jezgri daljnje povećanje broja neutrona ne održava stabilnost jezgre. Jezgre s većim atomskim brojem nestabilne su te se raspadaju, a pri raspadu se javlja emisija radioaktivnog zračenja. Nove se jezgre nastavljaju raspadati sve dok ne dođu do stabilnog stanja koje se nalazi oko linije stabilnosti.

Kod masivnijih jezgara energija vezanja po nukleonu opada u tolikoj mjeri da postane nedovoljna za stabilnost jezgre te dolazi do pojave radioaktivnosti. Radioaktivnost kao pojava vezana je za stabilnost atomske jezgre [3].

3. Otkriće radioaktivnosti

Henri Antoine Becquerel (Slika 3.) potaknut otkrićem rendgenskih zraka i Poincarove tvrdnje da rendgenske zrake mogu nastati i bez katodnih cijevi, napravio je pokuse s dvosolima kalijeva i uranijeva sulfata. Kad se uvjerio da omot od crnog papira potpuno štiti fotografsku ploču od sunčeva svjetla, izveo je pokus s fluorescencijom. Na fotografsku ploču, koja je bila zamotana u crni papir, stavio je mineral navedene dvosoli i namjeravao ih ostaviti nekoliko sati na jakom sunčevom svjetlu. Poslije razvijanja fotografske ploče se jako iznenadio jer je na njoj bila jasna slika minerala. Becquerel je ubrzo ustanovio da sunčevo svjetlo nije pobudilo mineral dvosoli na lučenje zraka koje su djelovale na fotografsku ploču. Naime, pri izvođenju pokusa nekoliko je dana bilo oblačno i mineral nije bio izložio djelovanju sunčeva svjetla.

Mineral je i bez prethodnog osvjetljavanja sunčevim svjetlom ispuštao nevidljive zrake i tako djelovao na fotografsku ploču kroz, za sunčeve zrake, neprozirni papir. Nastavio je s novim pokusima. Kasnijim pokusima utvrdio je da samo spojevi uranija ispuštaju nevidljive zrake, te je tako Becquerel 1896. godine otkrio radioaktivnost. Otkrio je da te iste zrake imaju djelovanje na čovjeka izazivajući crvenilo na koži. Također, te zrake ionizirale su zrak što je činilo zrak vodičem i omogućilo neutralizaciju nabijenog elektroskopa, te je utvrdio kako se aktivnost tih zraka ne mijenja tijekom dužeg vremena.



Slika 3. Henri Antoine Becquerel

Krajem 1897. godine ovim istraživanjem počinje se baviti mnogo znanstvenika među kojima i bračni par Curie. Već 1898. godine Marie Curie (Slika 4.) objavila je rad u kojem navodi kako je našla i druge tvari koje se mogu poistovjetiti s uranijem i njegovim zračenjem. To su bili torij i njegovi spojevi. U tom je članku također navela termin radioaktivnost kao svojstvo atoma, a ne utjecaja Sunca ili nečeg sličnog. Kasnijim pokusima M. Curie otkriva dva nova kemijska elementa koji su 400 odnosno 900 puta jače aktivnosti nego uranij, a to su polonij i radij. Maria Curie, Pierre Curie i Henri Becquerel podijelili su Nobelovu nagradu za fiziku 1903. godine.

Obrazloženje Švedske akademije znanosti bilo je: „Kao priznanje za izuzetne zasluge koje su iskazali zajedničkim istraživanjem fenomena radioaktivnog zračenja, kojeg je otkrio profesor Henri Becquerel“. Osam godina kasnije, Marie Curie dobila je Nobelovu nagradu za kemiju: „Kao priznanje za njezine zasluge za unapređenje kemije otkrivanjem elemenata radija i polonija, izolacijom radija i proučavanjem osobina i spojeva tog osobitog elementa“ [4, 5].



Slika 4. Marie Curie

Ernest Rutherford je 1899. objavio rad u kojem je mjerio brzinu gubitka naboja na elektroskopu uslijed ionizacije zraka uz pomoć uranija. Došao je do zaključka kako u uranijevim zrakama postoje dvije vrste različitih zraka, jedne koje se jače apsorbiraju nazivao je alfa-zrakama, a zrake s većom prodornosti beta-zrakama.

Francuski fizičar Paul Villard je 1900. godine otkrio još jednu komponentu uranijevih zraka, koje su bile najprodornije i nazvane su gama-zrake. Uskoro se pokazalo u čemu se sve razlikuju zrake (u prodornosti, otklanjanju u magnetskom polju, ...) [4].

4. Radioaktivnost i radioaktivni raspad

Radioaktivnost je proces spontanog raspada i transformacije nestabilnih atomskih jezgara praćen emisijom nuklearne čestice i/ili elektromagnetskog zračenja. U radioaktivnim procesima, elementarne čestice ili elektromagnetska zračenja emitiraju se iz jezgri atoma. Zračenja iz jezgre

dogadaju se i u drugim oblicima, uključujući emitiranje protona ili neutrona, te spontanijh nuklearnih fisija (cijepanja) masivnih jezgri [6].

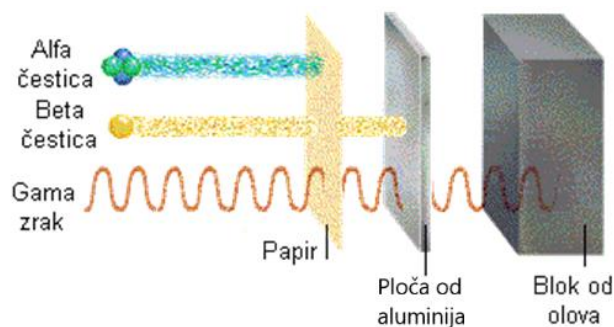
Radioaktivni raspad pretvara jednu jezgru u drugu ako nova jezgra ima veću energiju vezanja po nukleonu nego što je imala početna jezgra. Razlika u energiji vezanja (prije i poslije raspada) određuje koji se raspad mogu energijski događati, a koji ne.

Nuklearni su procesi promjene stanja i sastava atomske jezgre u kojima dolazi do emisije različitih vrsta zračenja, a dijelimo ih na radioaktivne raspade i nuklearne reakcije. Radioaktivni su raspad procesi u kojima radioaktivne jezgre spontano prelaze u niža energijska stanja uz emisiju bilo fotona ili čestica [1].

Nestabilna jezgra spontano se mijenja nastojeći, u jednom ili više koraka, doći u stabilno stanje. Takve promjene, kada se jezgra mijenja bez vanjskog utjecaja, zovu se radioaktivni raspad, a čestice i fotoni koje jezgra pri tome emitira nazivaju se radioaktivno zračenje. Osnovno je svojstvo radioaktivnog zračenja vrlo velika energija čestica i fotona. Naime, pri promjenama nestabilnih jezgri jedan se dio njezine mase (m) pretvara u energiju (E , energija raspada), po čuvenoj Einsteinovoj relaciji: $E = mc^2$, gdje je c brzina svjetlosti, koja iznosi 300 000 km/s. Slijedi da jedna jedina čestica radioaktivnog zračenja ima dovoljnu energiju da promijeni strukturu 10 000 molekula u tijelu, te se može pojedinačno detektirati našim makroskopskim elektronskim uređajima.

Radioaktivni raspad pripadaju ionizirajućem zračenju jer ioniziraju atome tvari na koju padaju, što uključuje i zrak. Radioaktivne raspade možemo podijeliti u tri skupine, a to su alfa-raspad, beta-raspad i gama-zračenje. Prilikom raspada dolazi do pretvorbe radioaktivne jezgre i emisije radioaktivnog zračenja. Među raspade se ubraja i gama-zračenje iako ono nije raspad u pravom smislu riječi jer se ne emitira nikakva čestica nego samo energija.

Sva tri navedena zračenja razlikuju se po energiji, masi, naboju i međudjelovanju s tvarima. Alfa-čestice može zaustaviti sloj papira, par centimetara zraka. Beta-minus čestice zaustavlja par milimetara aluminija ili par metara zraka. Gama-zračenje ima najveću dubinu prodiranja i zaustavlja ga deblji sloj željeza, olova ili betona, kao što je prikazano Slici 5. Najbolje ga apsorbiraju materijali velikog atomskog broja i velike gustoće [2].



Slika 5. Međudjelovanje radioaktivnog zračenja i tvari

Pri interakciji radioaktivnog zračenja i svih ostalih vrsta ionizirajućih zračenja i tvari dolazi do apsorpcije energije što može izazvati kemijske i biološke promjene u živom organizmu. U živoj stanici zračenje djeluje na životne funkcije stanice, a time i na živa tkiva, organe i organizme. Posljedica tog djelovanja promjena je funkcije stanice, poremećaj u diobi, promjene gena pa i smrt stanice. Djelovanje zračenja najčešće je štetno za tkiva, organe i organizme. Isto zračenje ne uzrokuje kod svih stanica isto djelovanje. Zato se razlikuje osjetljivost pojedinih vrsta stanica na zračenje, ali i individualna osjetljivost pojedinih stanica. Zbog razlike u osjetljivosti stanica velika je razlika u posljedicama ozračivanja različitih tkiva, organa i organizama. Općenito, manje su osjetljiva starija tkiva i stariji organi, a mnogo su više osjetljive mlađe stanice, dakle tkiva i organi koji se obnavljaju, prije svega unutrašnji organi, koštana srž, jajnici, sjemensne stanice, očne leće, a posebno embrij. Biološki efekti zračenja mogu se pojaviti na ozračenom pojedincu, kao i u potomstvu ozračenog pojedinca ako se ošteti nasljedni mehanizam.

Osim štetnog djelovanja radioaktivnog zračenja postoji i korisno djelovanje kroz mnogobrojnu primjenu u industriji, za proizvodnju energije, u medicinske svrhe za dijagnostiku i terapiju, za određivanje debljine materijala u automobilske industriji, za testiranje mlaznih motora u avio industriji, za određivanje gustoće materijala cesta na površini i ispod površine, u industriji nafte plina i rudarstva, u umjetnosti i tako dalje [6].

4.1 Alfa-raspad

Alfa-raspad je pretvaranje jedne atomske jezgre u drugu uz zračenje alfa-čestice, karakterističan za jezgre s više protona i neutrona. Alfa-čestica predstavlja zapravo jezgru helija (${}^4_2\alpha = {}^4_2\text{He}$) što je sustav od dva protona i neutrona. Prilikom alfa-raspada teške jezgre ona izgubi dva protona i

dva neutrona, što znači da se Z smanji za 2, a A smanji za 4. Nakon alfa-raspada nastaje novi kemijski element koji se u periodnom sustavu elemenata pomjera za dva mjesta u lijevo.

Simbolima to izgleda ovako: ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$

X – radioaktivna jezgra koja se raspada

Y – novonastala jezgra

Alfa-zračenje ima precizno definiranu energiju, odnosno spektar alfa-zračenja je linijski. Energije alfa-čestice kreće se u intervalu od 4 do 10 MeV. Zbog svoje velike mase i dva pozitivna naboja alfa-čestice jako reagiraju s tvari kroz koju prolaze. Tako da je domet alfa-čestica vrlo malen, u zraku on iznosi između 2 i 8 cm, dok u ljudskom organizmu ima domet od oko 0,03 mm.

Alfa-zračenje nije opasno za čovjeka ako se nalazi izvan organizma, jer ga već list papira ili sama koža može zaustaviti. Velik problem javlja se ukoliko dođe do ingestije ili inhalacije aktivnog izvora, zbog jake interakcije s tvarima i velike energije koju posjeduje, a koja se može pohraniti u samo jednoj stanici. Zato je njegovo štetno djelovanje izrazito jako. Alfa-emiteri uglavnom se koriste u onkologiji, kao usadci koji razaraju tumorsko tkivo (tzv. brahiterapije) [2, 3] .

4.2 Beta-raspad

Beta-raspad vrsta je radioaktivnog raspada atomskih jezgara izazvana utjecajem slabe nuklearne sile, pri kojem atomska jezgra zrači čestice kao što su: elektron, pozitron, neutrino, antineutrino, i ne dolazi do promjene atomske mase, već se samo atomski broj poveća ili smanji za jedan. Beta-raspade dijelimo na beta-minus raspad, beta-plus raspad i elektronski uhvat.

Beta-minus raspad (β^-) karakterističan je za nestabilne jezgre koje u suvišku imaju neutrone. U beta-minus raspadu neutron iz jezgre se raspada na proton i emitira W^- -bozon, koji se odmah raspada na česticu identičnu elektronu koju nazivamo beta-minus čestica (e^-) i antineutrino ($\bar{\nu}$). Pri beta-minus raspadu Z se poveća za jedan, a A ostaje isti, novonastala jezgra se nalazi jedno mjesto desno u periodnom sustavu elemenata.

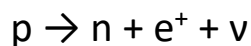
Simbolima to izgleda ovako: ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + W^- \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

Beta-minus čestica također kao i alfa-čestica ionizira tvar kroz koju prolazi, antineutrino je čestica bez naboja, mase puno manje od mase elektrona i s vrlo slabom interakcijom s tvari kroz koju prolazi.

Beta-plus raspad (β^+) karakterizira teške jezgre s manjkom neutrona. Kada se jezgra raspada preko beta-plus raspada, ona ostaje s istim brojem nukleona, jer se proton iz jezgre transformira u neutron uz zračenje W^+ -bozona. W^+ -bozon se odmah raspada na beta-plus česticu (pozitron, e^+) i neutrino. Što znači da se Z smanji za jedan, a A ostaje isti tako da se novonastali element u periodnom sustavu pomjera za jedno mjesto u lijevo.

Simbolima prikazano:
$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + W^+ \rightarrow {}_{Z-1}^AY + {}_{+1}^0e + \nu$$

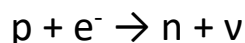


Beta-plus čestica predstavlja antičesticu elektrona s istom masom, ali nabojem suprotnog predznaka. Neutrino je čestica bez naboja i zanemarivo male mase. Beta-plus raspad uvijek prati tzv. anihilacijsko zračenje. Naime, nastali pozitron se usporava prolazom kroz materiju. Kada se praktički zaustavi i dođe blizu elektrona (svoje antičestice), nakon kratkotrajnog komešanja (“smrtnog plesa”), oboje nestaju. Kao energijski ekvivalent njihovih masa mirovanja najčešće nastaju dva fotona, svaki energije po 511 keV, koji odlaze u suprotnim smjerovima. Ta je činjenica pogodna za stvaranje slike distribucije beta-plus atoma u tijelu. Energija β -čestica varira od nule (kada je svu energiju odnio antineutrino) do ukupne energije raspada (kada je svu energiju odnijela β -čestica) [2, 3] .

Danas je poznato kako u beta-raspadu sudjeluju bozoni, čestice odgovorne za procese u kojima čestica koja sudjeluje mijenja predznak. Čestice nosioci slabe interakcije su W i Z-bozoni, vrlo masivne čestice. W-bozoni imaju električni naboj, dok je Z-bozon čestica bez naboja. Kada se neutron raspada na proton, on emitira W^- -česticu, tako da ukupan naboj ostane nula prije i poslije raspada. Pri tome se W^- -čestica odmah pretvara u elektron i antineutrino, čestice koje su opažene u laboratorijima kao produkti β -raspada neutrona. U sličnim reakcijama koje ne uključuju promjene u naboju neće se izmjenjivati W-bozoni, već Z-bozoni [7].

Elektronski uhvat je proces u kojem atomi bogati protonima u atomskoj jezgri mogu uhvatiti elektron iz prve K-ljuske elektronskog omotača, čime bi se proton promijenio u neutron, uz istovremeno zračenje neutrina. Proton i neutron moraju biti dio velike atomske jezgre da bi se to

ostvarilo. Kod elektronskog uhvata, jedan elektron iz elektronskog omotača, obično iz K ili L elektronske ljuske, bude uhvaćen protonom iz atomske jezgre, stvarajući neutron i neutrino:

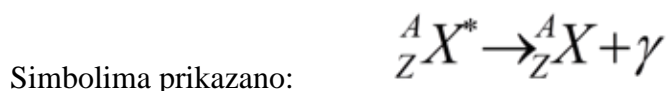


Kako se proton pretvara u neutron kod elektronskog uhvata, broj neutrona kod takvog atoma se poveća za 1, a broj protona se smanji za 1, dok atomska masa ostaje nepromijenjena. Tako dolazi do nuklearne pretvorbe budući da se radioaktivni atom pretvara u novi kemijski element. Iako je atom električki neutralan, on prelazi u pobuđeno stanje budući da jedan elektron nedostaje u elektronskom omotaču. Elektron će iz više ljuske prijeći u K ili L ljusku, a višak energije stvorit će foton rendgenskog zračenja i/ili će se ostvariti tzv. Augerov efekt. Augerov efekt predstavlja neradijativni prijelaz kod kojega se šupljina u unutarnjoj elektronskoj ljusci atoma popunjava elektronom iz vanjske ljuske, prenoseći energiju na drugi elektron koji biva izbačen. Atom u pobuđenom stanju, nakon elektronskog uhvata, obično zrači gama-čestice da bi prešao u stabilno stanje [2, 3, 8].

4.3 Gama-zračenje

Gama-zračenje dio je elektromagnetskog zračenja s jako kratkim valnim duljinama (manjim od 0,5 nm). Gama-zrake električki su nenabijene odnosno neutralne te se ubrajaju kao vrsta ionizirajućeg zračenja. Gama-zrake snopovi su fotona. Foton je kvant energije, odnosno "energetski paket", bez mase mirovanja.

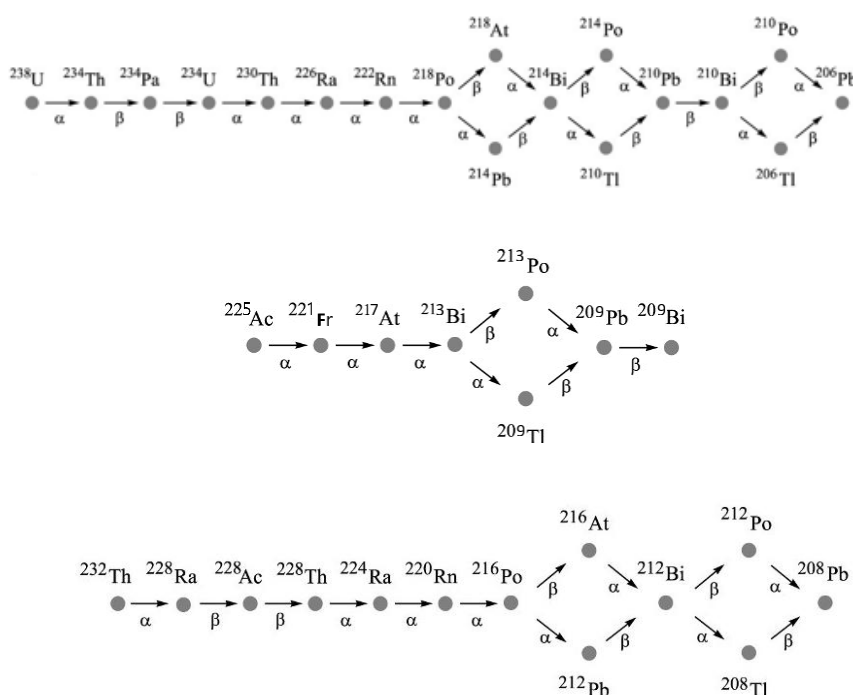
Gama-zračenje nastaje u slučajevima kada jezgra koja se raspada ostane u pobuđenom stanju. Pri povratku u niže stanje energije dolazi do emisije gama-zračenja, koje ne dovodi do promjene atomskog ni masenog broja. Emitira se samo čestica čiste energije pa jezgra dolazi u stabilno stanje. Gama-zračenje emitira se gotovo trenutno po raspadu jezgre [2, 3] .



* - pobuđeno stanje

4.4 Radioaktivni nizovi

Radioaktivni nizovi skupovi su prirodnih radioaktivnih elemenata koji nastaju jedni iz drugih slijedom određenih radioaktivnih raspada. Članovi niza međusobno su povezani svojim porijeklom jer nastaju jedni od drugih, a svi imaju zajedničkog roditelja. Radioaktivni nizovi nose naziv po svojim roditeljima. Na Zemlji postoje produkti samo prva tri radioaktivna niza: uranijev, aktinijev i torijev niz. Poslije niza alfa i beta-raspada, na kraju nizova se dobiva stabilni izotop, u slučaju uranija ^{206}Pb , na kraju aktinijevog niza ^{209}Bi , a na kraju torijevog ^{208}Pb , kao što je prikazano na Slici 6. Za svaki niz karakteristična je pojava grananje niza koja nastaje uslijed toga što neki radioaktivni elementi imaju dvostruku mogućnost raspada s odgovarajućom vjerojatnošću. Ti članovi u nizu ne raspadaju se uz emisiju samo jedne čestice, već je radioaktivni raspad popraćen emisijom različitih čestica [9].



Slika 6. Uranijev (U-238), aktinijev (Ac-225) i torijev (Th-232) radioaktivni niz

5. Ionizacijsko zračenje

Mogućnost ionizacije osnovna je posljedica prolaza radioaktivnih zračenja kroz materiju, pa radioaktivna zračenja nazivamo i ionizirajuća zračenja. Popratna je pojava mnogih prirodnih događaja u mikrosvijetu i dio kozmičkog zračenja, te umjetno potaknutih procesa u nuklearnim

reaktorima ili nuklearnim katastrofama. Međudjelovanje ionizirajućega zračenja i tvari osobito je ovisno o nositelju zračenja i njegovoj energiji.

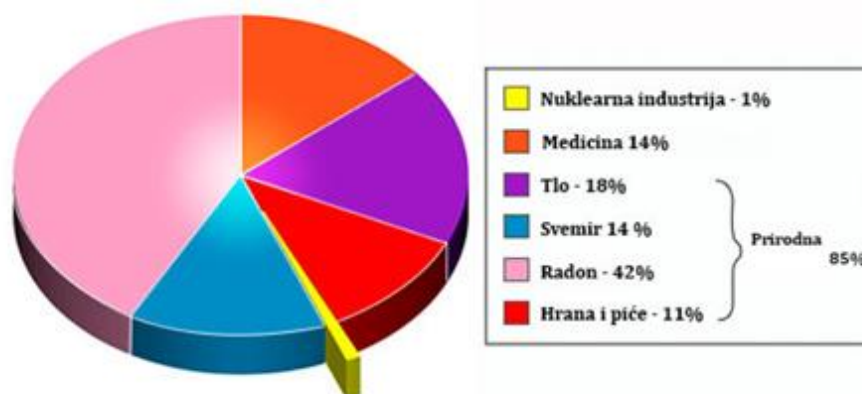
Ionizirajuće zračenje, čestično (korpuskulno) ili elektromagnetno (fotonsko) je zračenje koje nosi dovoljno energije po kvantu da ukloni elektron iz atoma ili molekule, uvodeći na taj način reaktivan i potencijalno štetan ion u sredinu ozračenog medija. U ova zračenja spadaju: α , β , γ i X (rendgenski zruci), kozmičko i neutronska zračenja.

Ionizirajuće zračenje svojim prolazom u tvari izravno ili neizravno izaziva nastajanje parova pozitivno i negativno električki nabijenih čestica – iona. Ionizirajuće zračenje posljedica je promjene stanja materije u mikrosvijetu. To su promjene u energiji ili u sastavu atoma ili atomske jezgre, pri čemu se emitiraju fotoni ili druge čestice. U međudjelovanju s tvari dolazi do izmjene energije i izmjene strukture ozračene tvari [1, 6].

Sve generacije živih bića bile su i bit će izložene ionizirajućem zračenju. Sve do otkrića radioaktivnosti čovjek nije bio svjestan da je zračenje dio njega i njegove okoline. Čovjek je izložen zračenju iz prirodnih izvora koji nisu posljedica ljudskog djelovanja, a koje se naziva prirodno zračenje.

Prirodni izvori zračenja nalaze se kako u okolišu, tako i u našem organizmu. Komponente zračenja okoliša su kozmičko zračenje koje dolazi iz svemira, zračenje tla i zidova, odnosno radon, plinoviti radioaktivni element koji iz tla ulazi u atmosferu (Slika 7.).

Umjetno zračenje dolazi od različitih izvora ionizirajućeg zračenja koje je stvorio čovjek u razne svrhe, npr. namjerno proizvodnje zračenja (rendgenski aparati, akceleratori čestica, neutronske izvori itd.) za primjene u medicini i znanstvenim istraživanjima, nuklearni reaktori za proizvodnju električne energije i znanstvena istraživanja, te nuklearno oružje u vojne svrhe. Neki od tih umjetnih radioaktivnih izvora kao radioaktivni otpad iz industrije, nuklearnih elektrana i nuklearnih eksplozija u atmosferi razneseni su zrakom i vodom na široke prostore i doprinose trajnom zračenju na stanovništvo. Prirodni i umjetni izvori zračenja izraženi u postotcima prikazani na Slici 7. [1, 2].



Slika 7. Prirodni i umjetni izvori zračenja

Ionizirajuće je zračenje pojava za koju ljudska osjetila nisu razvijena, za razliku od mnogih drugih pojava u prirodi. Izravne posljedice djelovanja ionizirajućeg zračenja na živi svijet većinom su zakašnjele i teško ih je povezati s uzrokom. Čovjek može biti izložen i smrtonosnoj dozi ionizirajućeg zračenja, a da u samom trenutku ozračivanja ništa ne osjeti. Posljedice ozračivanja, bez osjetilne veze s uzrokom zapažaju se tek nakon nekog vremena, od nekoliko sati do nekoliko dana ili čak godina, što ovisi o svojstvima tog zračenja [6].

6. Detektori zračenja

Ionizirajuće zračenje ne može se neposredno opažati. Kako bi se otkrilo prisustvo ovog zračenja, kao i njegove karakteristike, neophodno je koristiti posebne uređaje, detektore ionizirajućeg zračenja. Rad detektora uglavnom se zasniva na učinku ionizirajućeg zračenja, a postoje i oni detektori koji rade na nekom drugom principu, kao što je detektor zasnovan na scintilacijama ili nuklearnim emulzijama.

Prilikom prolaska zračenja kroz detekcijski prostor dolazi do raznih procesa na čijim se efektima zasniva rad detektora. Poslije prolaska zračenja dolazi do promjena u detekcijskom prostoru koji može biti u plinskom, tekućem ili čvrstom agregatnom stanju. Proces u plinovima nešto su jednostavniji jer se ioni slobodnije kreću nego u čvrstim tijelima [1].

Osnovna karakteristika svakog detektora njegova je efikasnost. Detektorska efikasnost pokazuje koji se dio od svih zračenja koja stižu do detektora detektira, a zavisi od vrste zračenja i njihove

energije. Ne postoji univerzalni detektor koji bi mogao detektirati sve vrste zračenja, zato postoje detektori koji su optimalni za pojedine vrste zračenja i za odgovarajuće opsege energija.

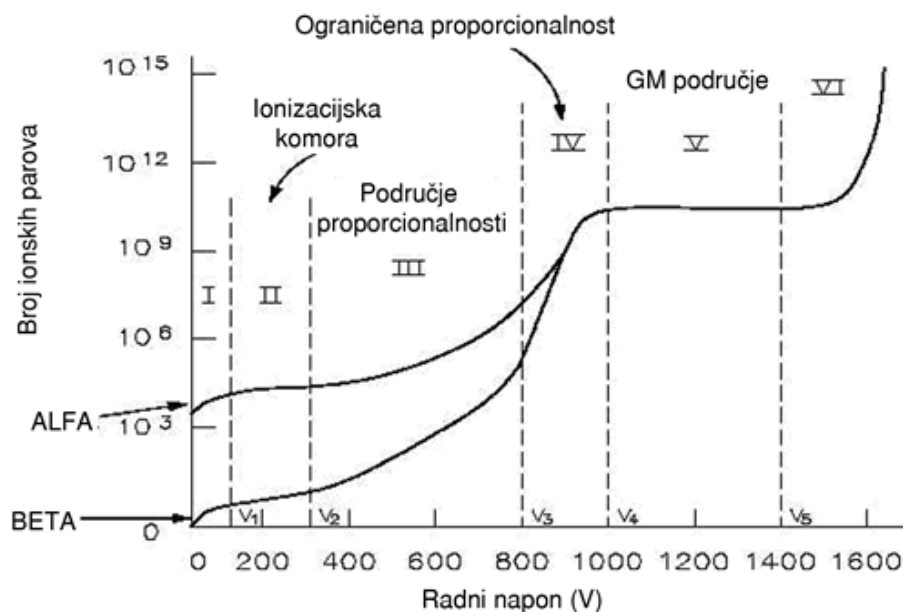
Alfa-zračenje ima jako male domete u čvrstim materijalima i zbog toga ne može biti detektiran od strane mnogih detektora. Veliki broj detektora potpuno je neosjetljiv na alfa-zračenje. Detektori beta-zračenja prave se od lakih materijala i njihove su radne površine veće nego za alfa-zračenje. Gama-zračenje zbog svoje velike prodornosti zahtijeva detektorsku sredinu od što težeg materijala i što većeg radnog volumena [3, 10].

6.1 Plinski detektori

Plinski su detektori najjednostavniji i najšire upotrebljavani detektori. Plinski detektor zračenja u detekcijskom prostoru ispunjen je plinom, čiji se atomi ioniziraju pod djelovanjem radioaktivnog zračenja. Zračenje međudjeluje s atomima plina, što za posljedicu ima nastanak ionizacije. Takav se detektor sastoji od dvije elektrode uronjene u plin, na koje se dovodi električni potencijal koji stvara električno polje između elektroda. Ionizirajuće zračenje prolazeći između spomenutih elektroda troši dio ili cijelu svoju energiju generirajući elektron - ion parove. Oba su člana para nositelji naboja te se kreću pod utjecajem električnog polja i na taj način uzrokuju eklektičnu struju čijom registracijom je moguće odrediti energiju koju je zračenje predalo plinu. Moguće je ionizaciju koju proizvede pojedina čestica pretvoriti u električni impuls te na taj način registrirati svaku pojedinu česticu. Za većinu plinova prosječna energija potrebna da bi se proizveo jedan ionski par iznosi oko 30 eV.

Postoje plinski detektori u kojima je električno polje tako jako da elektroni stvoreni u primarnoj ionizaciji na putu prema pozitivnoj elektrodi dobiju dodatnu energiju dovoljnu da sudaranjem s atomima plina proizvedu novi ionski par. Novo oslobođen elektron načini isto te se tako broj primarno stvorenih ionskih parova multiplicira takozvanom sekundarnom ionizacijom. Sve se odigrava trenutno i dobivene ionizacije ne razlikujemo, već ih registriramo kao jedinstvenu. Pokazalo se kako su dobiveni električni pulsevi znatno pojačani.

Plinski detektori imaju više područja rada koja ovise o jačini električnog polja u njima. Na Slici 8. prikazana je karakteristična ovisnost broja ionskih parova prilikom detekcije alfa i beta-čestica, o radnom naponu.



Slika 8. Graf ovisnosti broja ionskih parova o radnom naponu

U prvom (I) području prije detekcije signala dolazi do rekombinacije, to jest elektroni se vraćaju u orbite atoma. U drugom (II) području detektori koji se koriste su ionizacijske komore. U trećem (III-IV) području proporcionalnosti i ograničene proporcionalnosti koriste se proporcionalni detektori, tu je broj pulseva znatno pojačan ali uz zadržavanje proporcionalnosti s brojem primarno stvorenih ionskih parova. Geiger-Mullerovo područje (V) predviđeno je za Geiger-Mullerove brojače, u ovom području više nema razlike između signala od alfa i beta-čestice. Posljednje šesto (VI) područje je rada spark countera, odnosno detektora iskri, kao detektora zračenja [11].

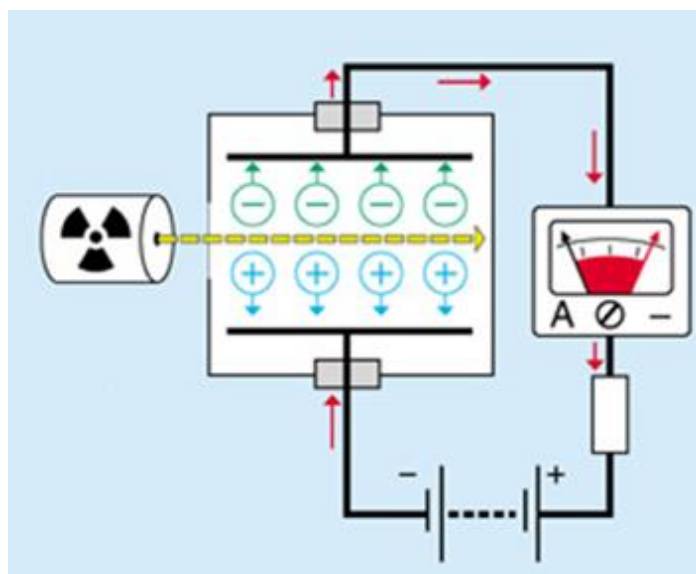
6.1.1 Ionizacijska komora

U ionizacijskim komorama (Slika 9.) sakupljaju se ioni koje oslobodi ionizirajuća čestica. Napon će se obično podesiti tako da je rekombinacija zanemariva i broj sakupljenih iona približno jednak ukupnom broju iona koje je čestica oslobodila. Sakupljanjem iona proizvodi se električni impuls koji signalizira prolaz čestice i sadrži u sebi sve podatke koje možemo dobiti o njoj. Signal se prenositi u elektronski dio aparature koji ga dalje obrađuje i registrira. Sakupljanje iona i stvaranje početnog impulsa traje određeno vrijeme. To vrijeme može biti duže ili kraće u zavisnosti od niza faktora. Ako je impuls vrlo kratak, na primjer 1/1000 dio sekunde, onda komora može pojedinačno registrirati impulse. Međutim, ako je impuls znatno duži, komora nije više u stanju registrirati pojedinačne impulse.

Prvi se tip zove impulsni, a drugi integralni; impulsni tip komore može prikazati ne samo broj čestica već i njihovu energiju, to jest može poslužiti kao spektrometar. Kako je energija razmjerna ukupnoj ionizaciji čestice, komora će raditi kao spektrometar ako se njezini fizički i geometrijski parametri podese tako da čestica izgubi cijelu energiju u aktivnom volumenu komore. Za alfa-čestice čiji domet u zraku ne iznosi više od par centimetara, dimenzije komore nisu velike. Beta-čestice znatno su prodornije s dometom reda veličine metra, a takve dimenzije komore bile bi velike. Zbog toga se impulsne komore češće upotrebljavaju za spektroskopiju alfa-čestica dok se kod beta-čestica uglavnom ograničavaju na izotope koje emitiraju elektrone niskih energija kao što je ^{14}C .

Integralna komora daje ukupni efekt koji proizvede neki fluks zračenja. Mjeri se struja ili napon u vremenskom intervalu. U ovom slučaju ne može se praviti razlika između čestica i njihovih energija niti se direktno dobiva broj čestica. Integralna komora mjeri ukupan broj iona koje zračenje oslobađa u aktivnoj zapremini, a ona je razmjerna energiji koju je zračenje oslobodilo. Postoji veliki broj ionizacijskih komora čije veličine mogu biti vrlo različite. Najčešće se susreću dvije forme komore, cilindrične ili planparalelne.

U oba slučaja komora ima pored anode i katode treću zaštitnu elektrodu. Njezin je glavni zadatak spriječiti impulse iz struje izazvane nekim drugim faktorima, nezavisnim od ionizirajuće čestice. Katoda i anoda električki su izolirane. Ne postoje idealni izolatori naročito u zavisnosti od njihove površine, preko njih mogu proteći male struje. S obzirom na to kako su struje iona često veoma male, lažne struje preko izolatora, koje se ne mogu razlikovati od pravih, izazvale bi pogrešna mjerenja. To se sprječava upotrebom zaštitne elektrode, s naponom bliskim naponu elektrode s kojom su povezani dijelovi aparature za registraciju koja se zove kolektor. Tako izolacija kolektora nije podvrgnuta velikoj razlici napona pa ne dolazi do lažnih struja. Kod planparalelnog tipa zaštitna elektroda je napravljena kako bi također služila za precizno određivanje aktivne zapremine komore [3, 10].



Slika 9. Ionizacijska komora

6.1.2 Proporcionalni brojač

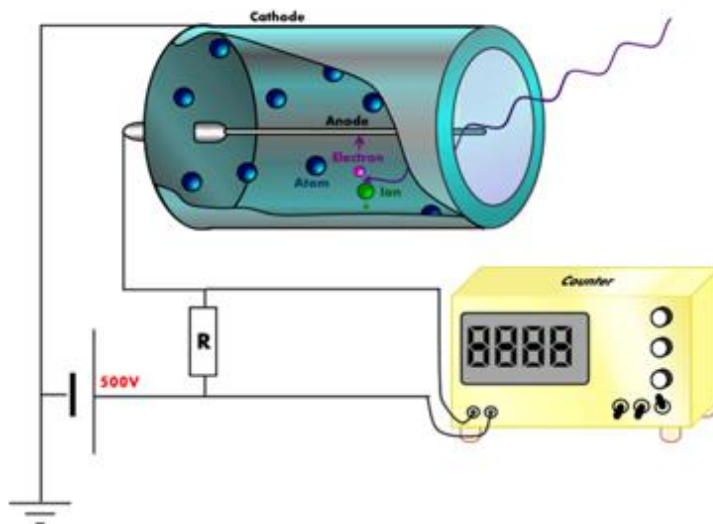
Proporcionalni brojač prikazan na Slici 10. daje impuls razmjernan energiji koju čestica utroši za ioniziranje plina. On se može koristiti za brojanje čestica bez obzira na njihovu energiju ili davati energetske spektar.

Zbog ovisnosti umnožavanja i visine impulsa o električnom polju konstrukcija proporcionalnog brojača je složena. Treba osigurati nepromjenjivost električnog polja, naročito na krajevima. To se postiže uvođenjem dodatnih elektroda kao kod ionizacijske komore. Ponekad se uvode i dvije pomoćne elektrode tako da ih ukupno ima četiri na raznim električnim potencijalima.

Plin kojim se puni brojač stalno protječe kroz njega ravnomjernom brzinom. Izvor se mora staviti u brojač, pa nije potreban prozor za mjerenje zračenja male prodornosti kao što su alfa-čestice. Zato što je kod proporcionalnih brojača lavina lokalizirana, on može detektirati neku novu česticu na drugom mjestu, dok proces detekcije prethodne čestice nije završen. Prema tome on brže broji od Geiger-Mullerovog (GM) brojača. Brzina brojenja ovisi o tome broji li proporcionalni brojač samo čestice ili mjeri i njihovu energiju. U prvom slučaju kao osnova mjerenja poslužit će kretanje elektrona, koje traje veoma kratko. Dvije čestice bit će brojene posebno ako jedna drugu slijede u razmaku od 0,1 do 0,5 μs .

Proporcionalni su brojači pogodni za mjerenje alfa-čestica, prvenstveno iz dva razloga. Njihovom upotrebom u protočnom obliku izbjegava se upotreba prozora. S druge strane elektronska aparatura može se podesiti kako bi primala samo veće impulse prouzrokovane alfa-česticama, dok beta i gama ostaju nedetektirane, što olakšava mjerenje alfa-čestica u prisustvu ostalog zračenja.

U slučaju beta-čestica proporcionalni se brojač upotrebljava za brojanje, dok kao spektrometar može mjeriti samo spektar nižih energija. Za veće energije trebalo bi znatno povećati dimenzije ili tlak što nije praktično [3, 10].



Slika 10. Proporcionalni brojač

6.1.3 Geiger – Mullerov brojač

Od svih plinskih detektora, GM brojač prikazan na Slici 11. ima najveću osjetljivost i daje najveći impuls. Dovoljno da čestica proizvede par iona u aktivnom volumenu, tako da je impuls 0,1-1 V. Međutim, impuls je isti za sve čestice, što znači da GM brojač ne može raditi kao spektrometar, to jest nema razlike pri brojenju alfa i beta-čestica.

Ako se pretpostavi da je čestica oslobodila jedan par iona, električno će polje usmjeriti elektrone ka žici. Na putu se stalno sudaraju s molekulama plina i pri tome gube veći ili manji dio energije koju su primili u električnom polju. Kad se približe žici na udaljenosti manjoj od milimetra, električno je polje dovoljno jako da između dva sudara elektrona primi dovoljno energije da u sljedećem sudaru ionizira molekulu s kojom se sudario. Dva elektrona nastavljaju dalje i poslije sljedećeg sudara izbacuju još dva elektrona itd. Tako dolazi do naglog umnožavanja iona. Proces je sličan formiranju lavine pa se naziva Townsendova lavina. U GM brojaču početna lavina rađa druge i one se prenose duž cijele žice.

Određeno vrijeme nakon prve lavine njihovo prostiranje prestaje, elektroni su praktički već pokupljeni i jedino ostaje pozitivni oblak oko žice, te je u tom trenutku detektor mrtav. Ako neka ionizirajuća čestica uđe u njega, elektroni koje ona oslobodi ne bi mogli proizvesti nove lavine jer je električno polje oko žice preslabo. Ako je oblak dalje od žice, njegovo zaštitno djelovanje

postaje manje efektivno i električno polje oko žice raste prema normalnoj vrijednosti. Poslije izvjesnog vremena ono naraste toliko da može proizvesti malu lavinu. Detektor prestaje biti mrtav i oporavlja se. Lavina koju bi neka čestica mogla proizvesti postaje sve veća. Impulsi se mogu registrirati i kad su manji od normalnog tako da čestica može biti detektirana i registrirana prije završetka vremena oporavljanja. Vrijeme od prolaska čestice pa do trenutka kad se nova čestica može registrirati zovemo vrijeme razlaganja. Ono ne zavisi samo od detektora već i od uređaja za registraciju. Rad GM brojača zavisi od korištenog napona. Pri niskom naponu brojač ne radi. Poslije izvjesnog provođenja brojač proradi. Ako se napon i dalje povećava broj impulsa naglo raste, da bi zatim pri daljoj promjeni napona vrlo malo rastao. Najpogodniji je rad s nekim srednjim naponima gdje se broj impulsa malo mijenja. Tad broj impulsa praktički ne zavisi od eventualnih manjih promjena napona [3, 10].



Slika 11. Geiger - Mullerov brojač

6.1.4 Spark counter

Spark detektori uređaji su koji detektiraju električne iskre kao posljedicu prolaska zračenja kroz određeno osjetljivo područje detektora. Nešto opširnije o njima prikazano je u idućem dijelu.

7. Spark detektor

Pojava električnog pražnjenja u plinovima fenomen je koji se kvalitativno proučavao od davnine, a s obzirom na ogromnu složenost procesa koji su uključeni u njihovu formiranje, predstavlja i danas predmet rasprava i istraživanja. Plin u svom normalnom stanju gotovo je savršen izolator.

Pri uobičajenim atmosferskim uvjetima zrak je loš vodič električne energije, međutim, kada se u plinu utvrdi električno polje dovoljnog intenziteta između dvije elektrode, od izolatora plin će

prijeći u stanje djelomične električne vodljivosti. Što je veća vlaga u zraku, vođenje struje je bolje. Pojava iskrenja događa se za vrijeme oluja kad sijevaju munje. Unutar oblaka nalaze se kapljice vode i komadići leda. Tople struje zraka uzdižu ih, a sila teža ih privlači prema Zemlji. Čestice u oblaku postaju nabijene i s vremenom se razdvajaju na pozitivan i negativan naboj. Pozitivno nabijene čestice putuju prema gornjem dijelu oblaka, a negativne prema donjem. Kad naboji postanu preveliki, a oblak preblizu tlu, nastane velika iskra. Dolazi do ionizacije zraka između tla i oblaka. Tako nastaje električki vodljiv put kojim se munja spušta do tla.

Utvrđeno je da alfa-čestice koje zrače iz raznih radioaktivnih elemenata proizvode ionske parove u plinu. Ako se taj plin nalazi između velikog električnog potencijala tada može doći do iskrenja kao u slučaju munje. Alfa-čestica, koja se emitira u raspadu, ionizira plin te on postaje vodljiv. Na načelu ionizacije zasnivaju se mnogi mjerni instrumenti u fizici i kemiji.

Švicarski fizičar Heinrich Greinacher svojim je otkrićima 1920. godine, prvi razvijao metode detekcije nabijenih čestica [12].

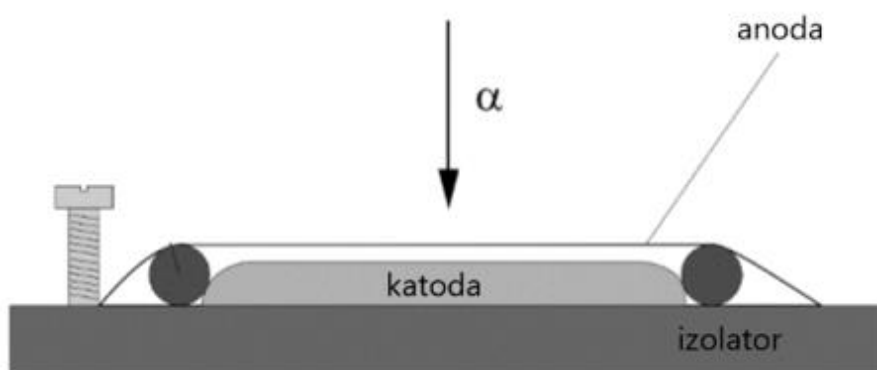
W. Y. Chang i S. Rosenblum učinili su značajan napredak usavršavanjem detektora koji je razvio Heinrich 1944. godine [13]. Prvi izvorni projekt kojeg su predložili W. Y. Chang i S. Rosenblum izgledao je tako da je katoda od metalne pločice, dok je anoda oblikovana od žica. Razmak između katode i anode iznosio je 2,5 mm, a napon između njih bio je oko 5000 V. Za izvor alfa-zračenja korišten je tipični ^{241}Am aktivnosti od 37 kBq.

Od tog vremena do prve polovice sedamdesetih godina spark detektor je proučavan od strane više znanstvenika. Usredotočili su se na reakciju spark detektora kada je izložen alfa-česticama pri atmosferskom tlaku. Podatke koje je prikazivao jedan istraživač teško su mogli reproducirati ostali [12]. Sve je to dovelo do napuštanja istraživanja spark detektora kao pouzdanog istraživačkog instrumenta. Iako su i dalje ostala mišljenja kako spark detektor može igrati veliku ulogu u nuklearnoj znanosti i tehnologiji.

Josemary Angélica Corrêa Gonçalves 1993. je provodio istraživanja kako bi razjasnio sukobljene rezultate pronađene u literaturi i riješio problem propadanja elektroda detektora uzrokovane iskrama [12]. Opisuje operativne principe i karakteristike jednog od ovih uređaja. Uočava kako je uporaba spark detektora prikazanog na Slici 12. kao pouzdanog alata za istraživanje tek u povojima, prisutni su problemi s ponovljivosti i pouzdanosti. Neke prilagodbe prvom modelu značajno su poboljšale osjetljivost na alfa-čestice. Jedan od modela spark countera sastoji se od čvrsto nategnutih žica koje predstavljaju anodu, ispod kojih je paralelno postavljena metalna

pločica koja služi kao katoda. Kada se radioaktivni izvor približi detektoru, zrak između žice i metalne pločice postaje ioniziran, što ga čini vodljivim. Uslijed jakog električnog polja između katode i anode iskre preskaču taj jaz.

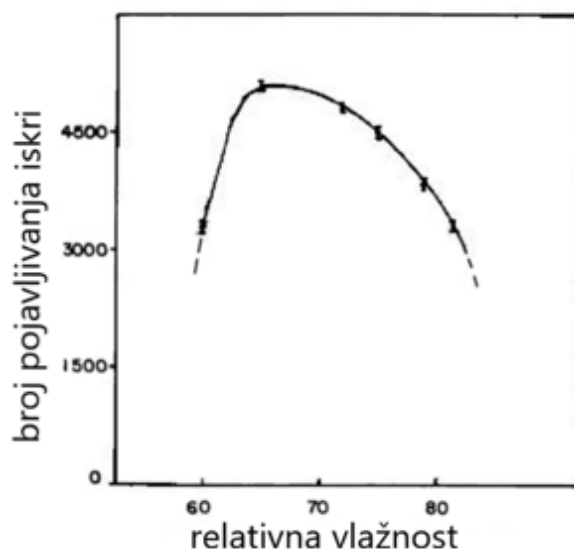
Zbog velikog napona u detektoru nema popratnih šumova nego samo zvučni i svjetlosni signal iskre od strane alfa-zračenja. Jedna je od prednosti detektora upotreba zraka kao plina, što ne zahtijeva posebna održavanja niti plinove visoke čistoće (što bi znatno poskupljivalo i otežavalo izradu detektora). Također, spark counter je moguće napraviti u raznim dimenzijama s obzirom na jednostavnost izgradnje.



Slika 12. Shematski prikaz spark countera

Korištene su razne vrste žica i različitog promjera, kao i razne vrste metalnih pločica za katodu. Nastojalo se izabrati materijale koji će što manje propadati pri radu detektora. Izrada detektora je ovisila o više faktora kao što su: vrste i promjeri žica, njihova udaljenost, paralelnost, napetost, geometrijska struktura, sastav, kao i vrste katoda i plin između elektroda. Eksperimentalni podaci dobiveni od strane Gonçalves potvrđuju važnost odnosa između napetosti i promjera žica.

Drugi čimbenik koji se odnosi na učinkovitost detektora vlažnost je zraka. S promjenom relativne vlažnosti u zatvorenoj komori u kojoj je moguće kontrolirati takve uvjete, može se dobiti vrijednost relativne vlažnosti u kojoj detektor dobiva točnije rezultate. Za relativnu vlažnost iznad 50% učinkovitost detekcije je veća, a ispod ove vrijednosti praktički se ne pojavljuju iskre između elektroda. Maksimalna učinkovitost dolazi kod vrijednosti oko 65% relativne vlažnosti kao što je prikazano na Slici 13.



Slika 13. Ovisnost pojavljivanja iskri o relativnoj vlažnosti

Osim ovih, drugi čimbenici, kao što je vrijeme uporabe žica i ploče, mogu ometati dobivene vrijednosti, zbog toga se one moraju mijenjati nakon određenog vremena. Zamjena oštećenih elektroda vrši se zbog oštećenja izazvanih iskrama među njima, zbog visokog zagrijavanja i ionizacije koja može proizvesti izolacijske slojeve na elektrodama pa se smanjuje učinkovitost detektora. [12, 13]

8. Izrada detektora

Zadatak je bio napraviti što jednostavniji spark detektor, koji se sastoji od žičane anode i metalne pločice koja predstavlja katodu. Korištenjem izvora visokog napona od oko 5 kV i stvaranjem jakog električnog polja između elektroda izvršila bi se demonstracija detekcije radioaktivnog zračenja.

Kako bi se materijalizirala ideja o izradi spark detektora prvi je korak bila nabava opreme koja će se koristiti u izradi (bakrena žica, tiskana pločica, metalna pločica, izvor visokog napona, izvor zračenja, vodiči i drugi potrebni alati).

Izrada prve radne verzije spark detektora nije mogla započeti prije samog testiranja jakosti izvora radioaktivnog zračenja. Postavljalo se pitanje postoje li dovoljno jaki emiteri radioaktivnog zračenja na Odjelu za fiziku koji bi mogli ionizirati zrak da postane vodljiv.

Korišteno je više alfa-emitera (^{241}Am od 370 kBq i 74 kBq) prikazanih na Slici 15. s različitim aktivnostima koji su mogli biti detektirani. Spark detektor nema mogućnost raspoznavanja radioaktivnih elemenata, što znači da ne može odrediti od kojeg radioaktivnog elementa dolazi zračenje. Važno je napomenuti kako su korišteni drugi beta i gama izvori (^{90}Sr od 74 kBq i ^{22}Na od 74 kBq) prikazani na Slici 14. Oni nisu izazvali iskrenje na spark detektoru, što je značilo da oni nemaju dovoljno veliku energiju za ionizaciju zraka između elektroda.



Slika 14. Beta-emiteri



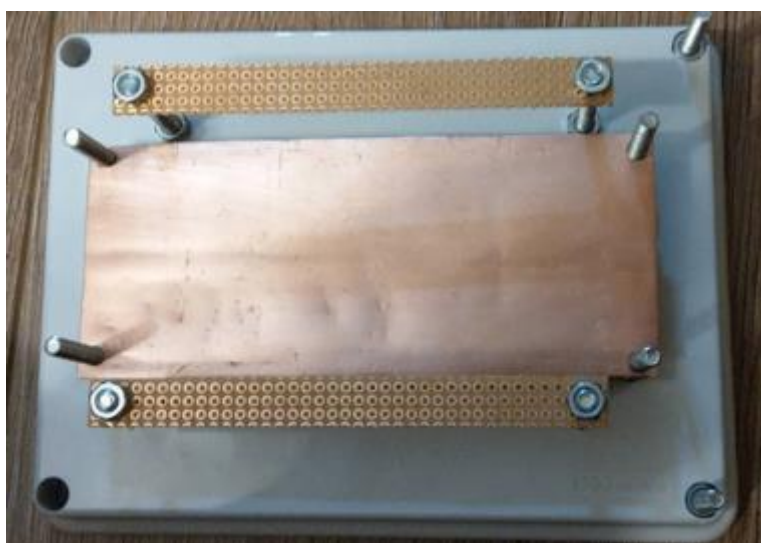
Slika 15. Alfa-emiteri

Izrađena je prva radna verzija detektora prikazanog na Slici 16. To je urađeno kroz nekoliko koraka: s bakrenih žica prethodno skinuti lak uz pomoć koga je žica izolirana, izrezati otvor na tiskanoj pločici na koju je paralelno zalemljeno osam bakrenih žica. Pomoću stezaljke postavljena je tiskana pločica s fiksiranim bakrenim žicama koje će služiti kao anoda, na drugoj stezaljci ispod bila je postavljena bakrena pločica koja predstavlja katodu. Uspostavom električnog polja visokog napona između elektroda koje je bilo ispunjeno zrakom detektor je izložen djelovanju radioaktivnog zračenja.



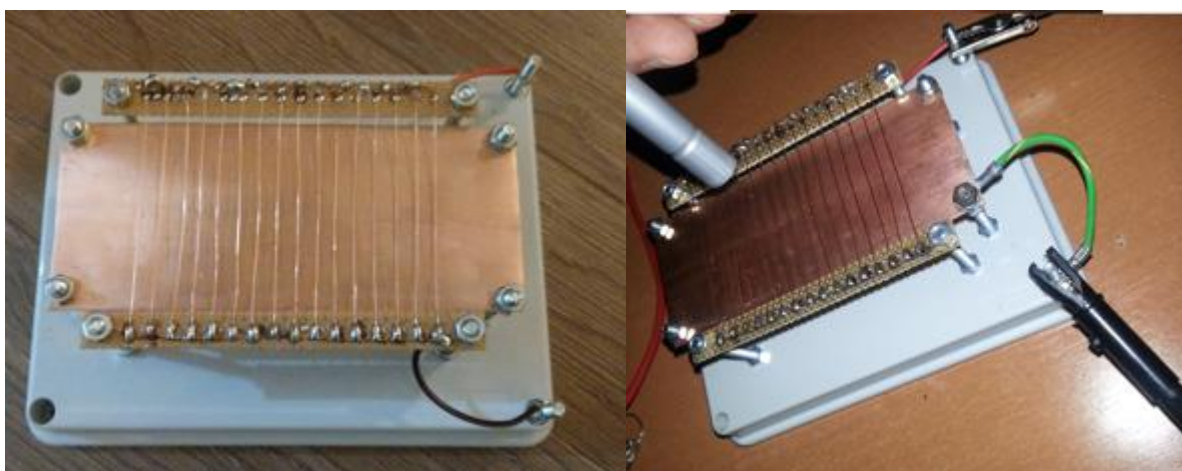
Slika 16. Prva radna verzija detektora

Kao izvori radioaktivnog zračenja upotrijebljeni su americij, stroncij i natrij. Do pojave zvučnog i svjetlosnog podražaja između anode i katode došlo je samo kada je detektor bio izložen izvoru radioaktivnog zračenja alfa emitera. Stroncij i natrij nisu izazivali svjetlosne i zvučne podražaje, odnosno nisu imali dovoljno energije za ionizaciju zraka između elektroda. Izvedeno testiranje bila je potvrda za funkcionalnost detektora. Iako su bakrene žice uredno bile zalemljene za tiskanu pločicu, brzo su izgubile svoju napetost i paralelnost. Došlo je do pojave spontanog prijelaza iskre što je za posljedicu imalo da cijeli detektor radi preko samo jedne žice. Više nije bila osigurana ujednačena udaljenost između anode i katode detektora koja bi održavala simetriju električnog polja. Treba podsjetiti kako je propadanje elektroda bio glavni problem rada spark detektora. Kao što je prikazano na Slici 17. pri daljnjem radu ispravljan je taj nedostatak.



Slika 17. Izrada spark detektora

Zbog malog dometa alfa-čestica bilo je potrebno konstruirati pomičnu katodu, koja bi se spuštala i dizala uz zadovoljenje uvjeta paralelnosti s anodom. Kao izolator, to jest postolje detektora, upotrijebljena je plastična kutija na kojoj su postavljeni vijci koji su fiksirali tiskane pločice na koje je zalemljeno šesnaest bakrenih žica prikazanih na Slici 18. koje su služile kao anoda. Bakrena je pločica pričvršćena na izolator vijcima koji su uz pomoć matica omogućavali spuštanje i dizanje katode na određene udaljenosti od anode. Katoda odnosno bakrena pločica pričvršćena je na negativni pol izvora i uzemljenje, a anoda odnosno bakrene žice spojene su na pozitivan pol izvora napona.



Slika 18. Druga radna verzija spark detektora

Nakon podešavanja uređaja i izlaganja detektora radioaktivnom zračenju alfa emitera, na uređaju je došlo do pojave iskri, kao što je prikazano na Slici 19. Nakon nekog vremena uslijed djelovanja iskri žice su izgubile svoju napetost i paralelnost.



Slika 19. Iskrenje pod utjecajem emitera radioaktivnog zračenja

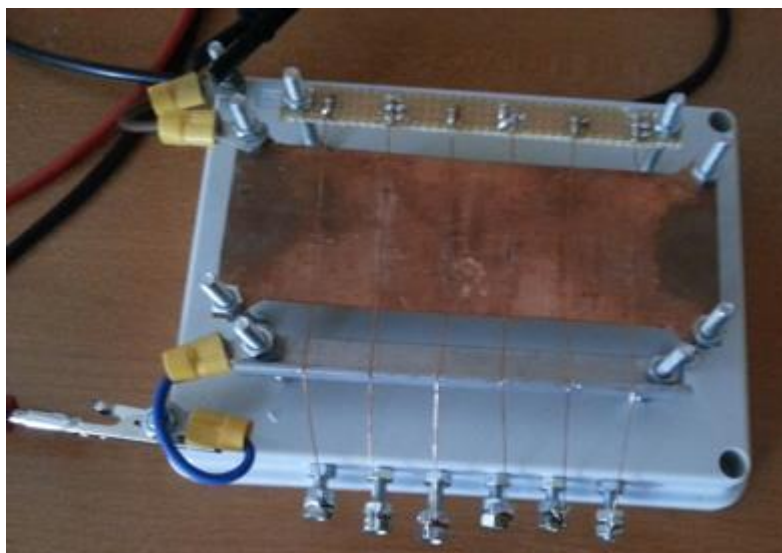
Prilikom popravljanja nedostataka spark detektora trebalo je osim anode doraditi i katodu zbog velike blizine žica rubovima katode. Kako bi se zategnule žice i odmaknule od rubova katode izvršeno je umetanje izolatora na krajeve katode u obliku plastičnog štapića ili šibice. U oba slučaja, zbog visokog napona, događa se proboj iskri uz sam izolator. Pri vrlo visokom naponu drvo (šibice) počinje gorjeti i time je stvoren vodljivi sloj između anode i katode. Rješenje je bilo u smanjivanju dimenzija katode na bočnim stranama, prikazano na Slici 20.



Slika 20. Dorada metalne pločice

Utvrđeno je kako se bakrene žice moraju postaviti tako da ih se tijekom dužeg vremena korištenja može zatezati, uslijed istežanja gubile su potrebnu napetost i paralelnost. To je riješeno lemljenjem jednog kraja bakrene žice, dok je drugi kraj bakrene žice namotan na vijak preko kojeg se vrši zatezanje žice. Bakrene su žice postavljene u žljebove na aluminijskom L profilu. Ovi žljebovi osim razmaka između žica, osiguravaju i strogu paralelnost između njih i u odnosu na katodu.

Na postolje je postavljena dorađena katoda, a umjesto početnih šesnaest žica novi detektor se sastoji od šest žica koje su zalemljene na tiskanoj pločici s jedne strane i zategnute na šest vijaka s druge strane kao što je prikazano na Slici 21. Time je postignuta mogućnost zatezanja svake žice posebno uz pomoć vijaka i matica. Ostale su komponente detektora zadržane.



Slika 21. Spark counter

Nakon što je spark detektor doveden na zadovoljavajuću razinu, izvršeno je testiranje uređaja. Detektor je spojen na izvor izmjenične struje, napona oko 5 kV u ovisnosti od udaljenosti izvora zračenja od katode i anode. Alfa emiter ionizira zrak između katode i anode, što je za posljedicu imalo stvaranje iskre koja predstavlja očitavanje radioaktivnog zračenja odnosno alfa-čestice.

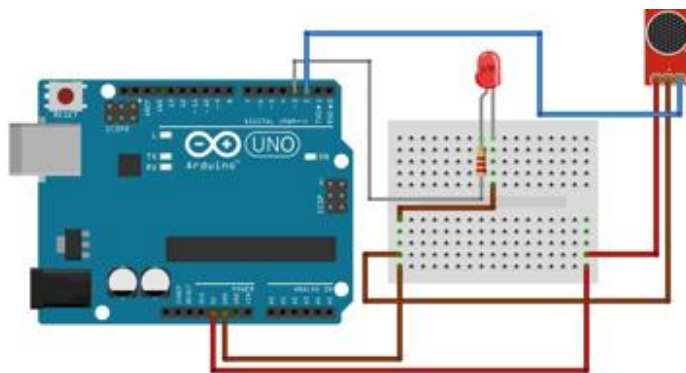
Ovako konstruiran spark detektor mogao je kroz određene pokuse pokazati svoju primjenu kao što je detekcija alfa-čestica, prodornost alfa-čestica, domet alfa-čestica i samo brojanje alfa-čestica koje se manifestiraju kao iskre između elektroda pomoću ljudskog osjetila sluha i vida.

9. Konstrukcija Arduina

Nakon testiranja detektora, pojavio se novi izazov pokušati konstruirati uređaj koji će brojiti svaku iskru koja se pojavi putem ionizacije zraka alfa zračenjem. Ideja je bila uz pomoć Arduina napraviti detektor zvuka, koji će zvučne signale od iskri brojiti i zapisivati a mjerenja prikazati na ekranu računala.

Arduino je elektronička prototipna platforma namijenjena kreiranju elektroničkih projekata. Sastoji se od hardware dijela koji je zapravo fizički elektronički programibilni strujni krug (poznat kao i mikrokontroler) i software dijela koji se naziva IDE (Integrated Development Environment) [14].

Za izradu uređaja bili su potrebni Aduino uno, vodiči, eksperimentalna pločica, USB kabel, 5 mm crvena LED-ica, otpornik ($220\ \Omega$) i modul detektora zvuka, kao što je prikazano na Slici 22.



Slika 22. Shematski prikaz spoja

Princip rada je detektirati zvuk uz pomoć modula detektora zvuka, koji se dobiva prilikom iskrenja. Napisan je kod za program u Arduino 1.8.5 verziji koji bi na ekranu ispisivao broj zvučnih podražaja, prikazan na Slici 23. Arduino upali lampicu kao znak registracije zvuka.

```
int soundSensor = 2;
int LED = 3;
int a = 0;
int b = 0;
void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    pinMode (soundSensor, INPUT);
    pinMode (LED, OUTPUT);
}

void loop()
{
    int statusSensor = digitalRead (soundSensor);

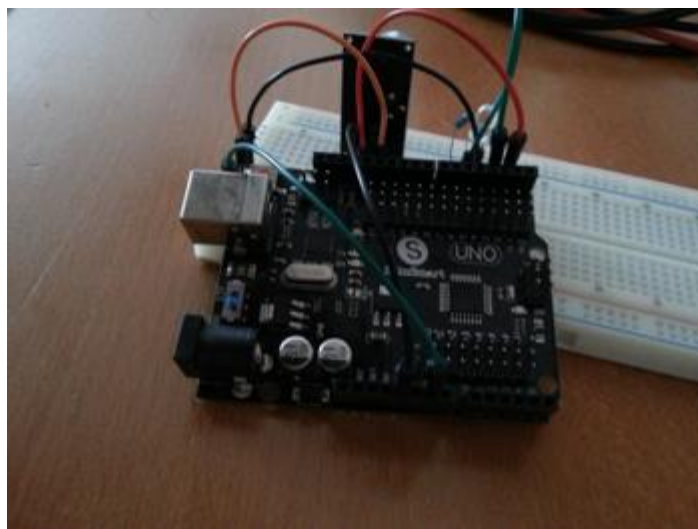
    if (statusSensor == 1)
    {
        digitalWrite(LED, HIGH);
        a=a+1;
        Serial.println(a);
        if (a>15)
        {
            a=0;

            b++;
            Serial.println("Broj iskri je");
            Serial.println(b);
        }
    }

    else
    {
        digitalWrite(LED, LOW);
    }
}
```

Slika 23. Kod za brojanje iskri

Uređaj je mogao na testiranje nakon sastavljanja, programiranja i spajanja na računalo. Uz pomoć potencijometra na detektoru zvuka namješteno je koliki zvučni podražaj će biti očitano, kako ne bi svaki šum bio zabilježen kao iskra. Nakon spajanja svih komponenti uređaj je prikazan na Slici 24.



Slika 24. Arduino uno

10. Testiranje detektora i Arduina

Prilikom prvog testiranja rada detektora i Arduina uočeno je kako nakon nekog vremena Arduino prestaje ispisivati podražaje na računalu, iako uređaj još uvijek reagira i LED-ica se uredno pali na svaku iskru, to je prikazano na Slici 25.



Slika 25. Spark detektor i Arduino

Prva je pretpostavka bila ta kako je problem u samom programu ili uređaju. Međutim, uz pomoć ostalih zvučnih podražaja kao što je pucketanje prstima, računalo nastavlja brojiti bez obzira na duljinu zvučnog podražaja ili koliko dugo je mjerenje trajalo.

Našli smo se pred novim izazovom, svaki uređaj radio je pojedinačno. Sljedeći korak bio je udaljavanje Arduino uređaja od detektora, to je izvedeno uz pomoć kartonske cijevi dužine oko pola metra, kao što je prikazano na Slici 26. Na toj udaljenosti i većoj uređaj ponovno prestaje s radom.



Slika 26. Prvi pokušaj rješavanja problema

Sljedeća etapa je bila postaviti neku vrstu zaštite na vodiče i sam uređaj kako bi se smanjio utjecaj elektromagnetskog zračenja pri iskrenju, kao što je prikazano na Slici 27.



Slika 27. Arduino u Faradayevom kavezu

Osim zaštite vodiča, cijeli Faradayev kavez prekriven je aluminijskom folijom, ali ni to nije pomoglo kako bi detektor i Arduino radili bez problema.

Izazovi su se redali jedan za drugim, pa je proveden pokus sa statičkim nabojem koji je stvarao iskre uz pomoć Wimshurstovog elektrostatskog stroja, što je prikazano na Slici 28. Međutim, uređaj prestaje raditi nakon nekoliko iskri.



Slika 28. Pokus Arduina s Wimshurstovim elektrostatskim strojem

Provjereno je ima li razlike ako se na različita računala spoji Arduino, kako bi se utvrdilo da razlog nisu zastarjeli ili prespori računalni programi. Na različitim računalima pojavljivali su se isti problemi, što je dovelo do zaključka kako uzrok nisu zastarjeli ili prespori računalni programi. Kroz ova testiranja pokušalo se pronaći razlog prestanka rada uređaja, testirano je na više načina u nekoliko navrata, na kraju je utvrđeno kako je uzrok prestanka brojenja na računalu zapravo rad spark detektora. Sve je to potvrdilo kako iskrenje stvara problem uređaju za nastavak nesmetanog rada.

11. Pokusi

Pokus 1. Rad spark detektora

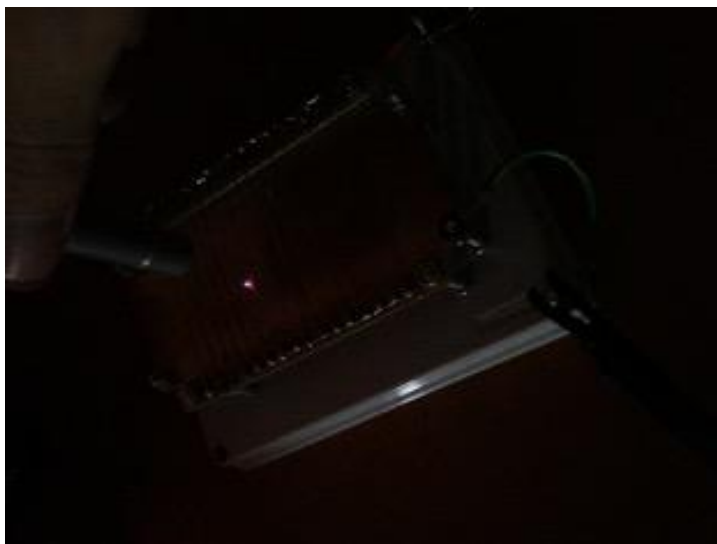
Zadatak: Demonstrirati kako spark detektor reagira na izvore radioaktivnog zračenja

Pribor:

- spark detektor
- izvor napona
- emiter radioaktivnog zračenja

Postupak izvođenja:

Spojiti izvor napona na spark detektor, bakrenu pločicu pričvrstiti na negativan pol izvora i uzemljenje, a bakrene žice spojiti na pozitivan pol izvora. Izvor napona postaviti na oko 5 kV. Spark detektor izložiti emiterima radioaktivnog zračenja, te uočavati iskrenje između anode i katode pri djelovanju emitera alfa-čestica, kao što je prikazano na Slici 29.



Slika 29. Detekcija alfa-čestice

Zaključak:

Pri uobičajenim atmosferskim uvjetima zrak je loš vodič električne energije, međutim, kada se u plinu utvrdi električno polje dovoljnog intenziteta između dvije elektrode, od izolatora plin će prijeći u stanje djelomične električne vodljivosti. Djelovanjem alfa-čestice koje zrače iz raznih radioaktivnih elemenata proizvode ionske parove u plinu te dolazi do iskrenja.

Pokus 2. Prodornost alfa-čestica

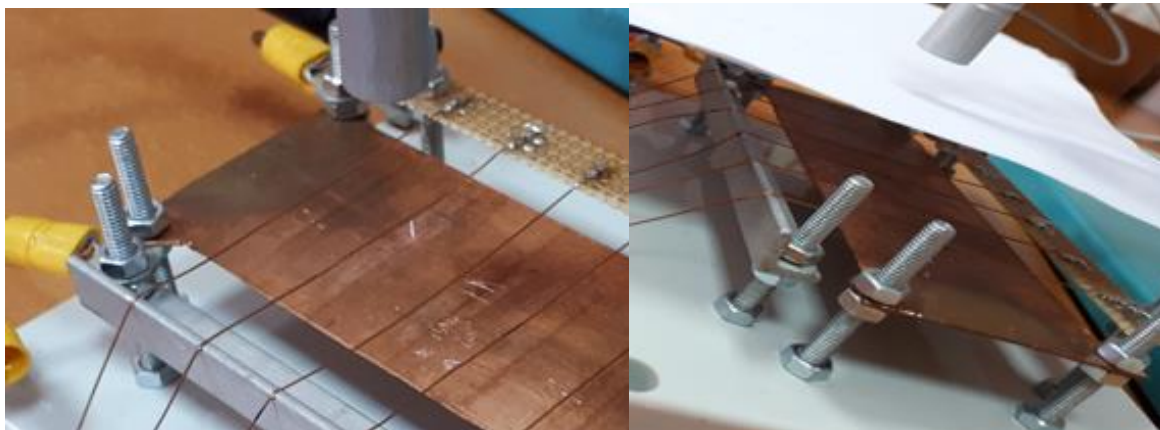
Zadatak: Demonstrirati kako papir zaustavlja alfa-čestice

Pribor:

- spark detektor
- izvor napona
- emiteri radioaktivnog zračenja
- list papira

Postupak izvođenja:

Spojiti izvor napona na spark detektor, bakrenu pločicu pričvrstiti na negativni pol izvora i uzemljenje, a bakrene žice spojiti na pozitivan pol izvora. Izvor napona postavimo na oko 5 kV. Spark detektor izložiti emiterima radioaktivnog zračenja, te uočavati iskrenje između anode i katode. Za potvrđivanje prisutnosti alfa-čestica, između izvora zračenja i anode postaviti list papira, prikazano na Slici 30.



Slika 30. Papir zaustavlja alfa-čestice

Zaključak:

Radioaktivna zračenja razlikuju se po energiji, masi, naboju i međudjelovanju s tvarima. Alfa-čestice može zaustaviti list papira. Nije došlo do stvaranje iskri iako je izvor radioaktivnog zračenja bio usmjeren na detektor. Međudjelovanje ionizirajućeg zračenja i tvari osobito je ovisno o nositelju zračenja i njegovoj energiji.

Pokus 3. Ovisnost broja iskri o udaljenosti emitera radioaktivnog zračenja

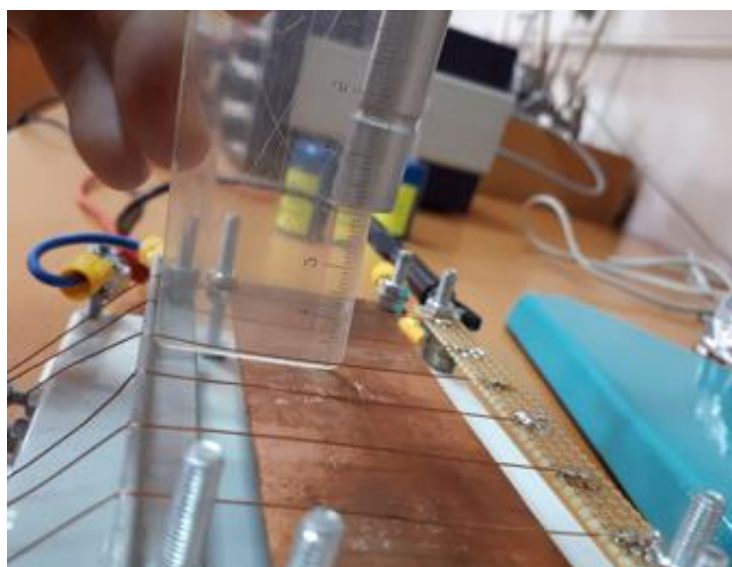
Zadatak: Odrediti ovisnost udaljenosti emitera radioaktivnog zračenja od detektora o broju detektiranih iskri

Pribor:

- spark detektor
- izvor napona
- emiter radioaktivnog zračenja
- štoperica
- ravnalo
- stalak s hvataljkama

Postupak izvođenja:

Spojiti izvor napona na spark detektor, bakrenu pločicu pričvrstiti na negativan pol izvora i uzemljenje, a bakrene žice spojiti na pozitivan pol izvora. Izvor napona postaviti na vrijednost od 6,70 kV. Koristiti radioaktivni izvor ^{241}Am s aktivnošću od 370 kBq. Nulu na ravnanu poravnati s žicom detektora, pomjerati emiter uz ravnalo te tako spark detektor izložiti radioaktivnom zračenju. Pri pojavi prvog iskrenja između anode i katode, položaj izmjeriti na ravnanu i ta vrijednost predstavlja najveću udaljenost na kojoj se javljaju iskre. Pomoću staka s hvataljkama fiksirati emiter okomito na detektor. Na istoj udaljenosti izvršiti pet mjerenja brojanjem iskri pomoću osjetila sluha i vida, u periodu od deset sekundi. Brojanje iskri u istim vremenskim intervalima izvesti na još šest udaljenosti emitera od detektora. Posljednja udaljenost bila bi najbliža detektoru gdje je još uvijek moguće prebrojati iskre u zadanom vremenu. Način određivanja udaljenosti emitera radioaktivnog zračenja prikazan je na Slici 31.



Slika 31. Određivanje udaljenosti emitera u odnosu na detektor

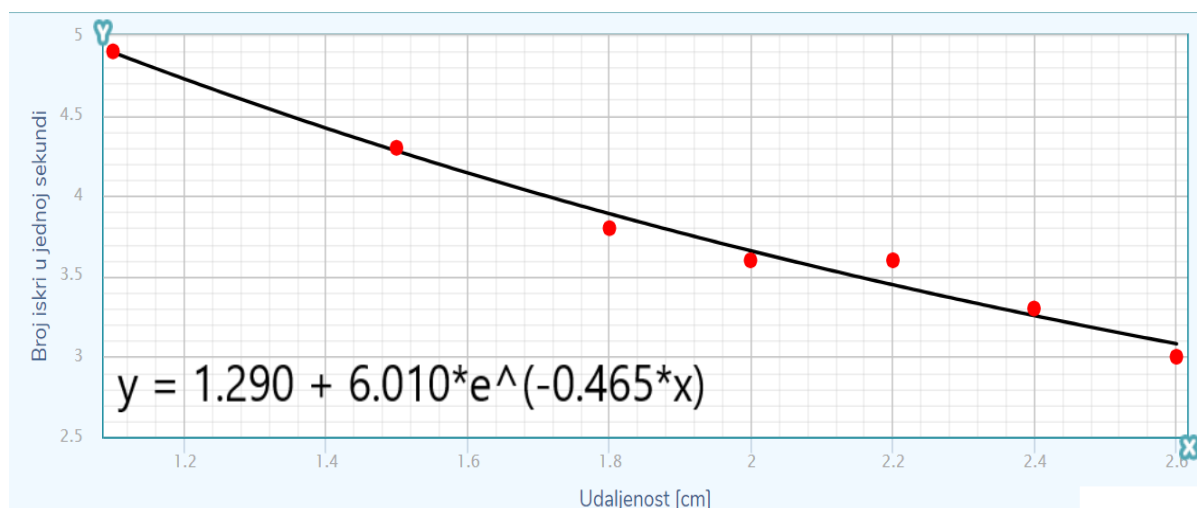
U tablici su prikazani dobiveni rezultati brojanja iskri u vremenskom periodu od deset sekundi za sedam različitih udaljenosti navedenih u indeksu. Za udaljenost od 2,80 cm srednja vrijednost broja iskri iznosi 30, na udaljenosti od 2,40 cm srednja vrijednost broja iskri je 33, kada se udaljenost smanji na 2,20 cm srednja vrijednost broja iskri povećala se na 36, na udaljenosti od 2,00 cm srednja vrijednost broja iskri bila je kao na udaljenosti 2,20 cm, na udaljenosti 1,80 cm srednja vrijednost broja iskri se povećava na 38, smanjenjem udaljenosti na 1,50 cm srednja

vrijednost broja iskri je porasla na 43, na najmanjoj udaljenosti od 1,10 cm na kojoj je još moguće prebrojati iskre osjetilom sluha i vida srednja vrijednost broja iskri povećala se na 49.

Tablica 1. Prikaz rezultata dobivenih mjerenjem

Broj mjerenja	Broj iskri $N_{2,80\text{ cm}}$	Broj iskri $N_{2,40\text{ cm}}$	Broj iskri $N_{2,20\text{ cm}}$	Broj iskri $N_{2,00\text{ cm}}$	Broj iskri $N_{1,80\text{ cm}}$	Broj iskri $N_{1,50\text{ cm}}$	Broj iskri $N_{1,10\text{ cm}}$
1	32	33	40	38	37	40	52
2	30	34	34	39	38	47	50
3	32	37	35	36	39	37	48
4	30	35	40	36	37	49	49
5	28	29	34	35	40	45	48
Srednja vrijednost	30	33	36	36	38	43	49
Broj iskri u jednoj sekundi	3,0	3,3	3,6	3,6	3,8	4,3	4,9

Dobiveni rezultati prikazani su pomoću grafikona, pokazalo se kako s povećanjem udaljenosti emitera radioaktivnog zračenja od detektora opada broj pojavljivanja iskri na detektoru, kao što je prikazano na Slici 32. Za provjeru pretpostavke opada li broj pojavljivanja iskri eksponencijalno s udaljenosti korišten je fit, dobivena je funkcionalna ovisnost $y = 1.290 + 6.010 * e^{-0.465*x}$ koja potvrđuje pretpostavku.



Slika 32. Grafikon ovisnosti udaljenosti o broju iskri u jednoj sekundi

Zbog nesavršenosti mjernih instrumenata i naših osjetila ni jedno mjerenje nije apsolutno točno. Mjerimo li neku veličinu nekoliko puta istim instrumentom i na isti način, dobiveni rezultati ipak će se razlikovati zbog neizbježnih pogrešaka pri mjerenju. Pojavljuju se odstupanja od srednje vrijednosti zbog nesavršenosti ljudskih osjetila, prva greška pri mjerenju se može pojaviti uslijed nepreciznosti ljudskog oka pri određivanju udaljenosti na ravnanu. Također, javlja se greška pri brojanju iskri naročito kada je izvor zračenja vrlo blizu detektoru zbog nesavršenosti osjetila sluha.

Testiranje statističkih hipoteza je postupak koji uključuje formuliranje statističke hipoteze i upotrebu podataka iz uzorka, kako bi se moglo odlučiti o ispravnosti formuliране statističke hipoteze. Postavljena je nulta hipoteza kako broja pojavljivanja iskri na različitim udaljenostima emitera od detektora opada linearno i alternativnu hipotezu kako razlika između broja iskri na različitim udaljenostima emitera od detektora opada eksponencijalno kao što je prikazano na grafu.

Kako bi se utvrdilo koji fit bolje odgovara dobivenim podacima određeni su koeficijenti determinacije. Što je koeficijent determinacije bliže broju jedan, to znači da je zadana funkcija bolje aproksimira funkcionalnu ovisnost mjerenja koja su izvršena. Izračunat je koeficijent determinacije koji iznosi 0,9881 što predstavlja vrlo reprezentativan model. Uz pomoć metode najmanjih kvadrata aproksimirana je linearna ovisnost mjerenja, tada je koeficijent determinacije iznosio 0,9593 što je manje od onog kod eksponencijalnog oblika krivulje. Što znači da eksponencijalna krivulja bolje odgovara pripadajućim podacima dobivenih mjerenjem broja iskri na različitim udaljenostima emitera od detektora. Nulta se hipoteza ne prihvaća jer je empirijska vrijednost koeficijenta veća od teorijske vrijednosti dobivene uz pomoć aproksimiranja linearne ovisnosti.

Zaključak:

Ovaj t test govori kako odbacujemo nultu hipotezu, a prihvaćamo alternativnu hipotezu, odnosno kako razlika između broja iskri na različitim udaljenostima emitera od detektora opada eksponencijalno.

Na Odjelu za fiziku zbog nedostatka opreme i kontroliranih uvjeta nisam mogao izvesti pokuse koje se odnose na ponašanje detektora pri promjeni relativne vlažnosti zraka, ponašanje detektora pri nižem i višem tlaku od atmosferskog, ponašanje detektora u vakuumu, brojanje iskri s detektora preko Arduina i računala.

12. Zaključak

Treba pojasniti kako se rad odnosi na demonstraciju procesa detekcije koji uključuje kvalitativne i kvantitativne aktivnosti te klasifikaciju zračenja prema vrsti zračenja. Kako su ovi pokusi izvedivi i za istraživanja i za didaktičke svrhe, stvarajući u oba slučaja, širenje razumijevanja radioaktivnog zračenja, došlo se do sljedećih zaključaka:

Detektor može otkriti samo alfa-zračenje pri radioaktivnom raspadu, jer samo alfa-čestice imaju dovoljnu energiju potrebnu za ionizaciju zraka i stvaranje iskri između katode i anode. Kad zračenje iz izvora zračenja prijeđe područje između žice i ploče, ionizira zrak smanjujući dielektričnu konstantu zraka, olakšavajući time formiranje iskri. Stoga, svaka iskra označava prolaz alfa-čestice.

Kako su alfa-čestice malog dometa, a velike mase, s dva protona i dva neutrona, te reagiraju s tvarima na koje nailaze na udaljenosti od par centimetara, za njih predstavlja prepreku i sam list papira koji im se nalazi na putu. Postoji područje od nekoliko centimetara koje predstavlja domet alfa-čestica u zraku, pa prema toj udaljenosti postavljamo izvor radioaktivnog zračenja od detektora.

Nije moguće odrediti o kojem se radioaktivnom elementu radi pri mjerenjima na spark detektoru, niti koliku količinu energije imaju te alfa-čestice. Detektor nam daje informaciju samo o broju čestica koje su prošle osjetljivo područje detektora.

Primjena napravljenog detektora u suvremenim istraživanjima nije velika, ali ima potencijal za primjenu pri demonstraciji detekcije zračenja, ionizacije zraka, prodornosti alfa-čestica, zaštita od zračenja te demonstracija kako zrak može biti vodič električne struje te se nadam da će se u tu svrhu spark counter kao detektor zračenja i koristiti kao demonstracijski alat u nastavi fizike na različitim kolegijima (Osnove fizike, Praktikum iz eksperimentalne nastave fizike, Uvod u radioekologiju, ...) preddiplomskih i diplomskih studija na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

13. Literatura

1. Jakobović, Z. Ionizirajuće zračenje i čovjek, Školska knjiga – Zagreb. 1991.
2. Janković, S.; Eterović, D. Fizikalne osnove i klinički aspekti medicinske dijagnostike, Zagreb: Medicinska naklada, 2002.
3. Cherry, S., Sorenson, J., Phelps, M. Physics in nuclear medicine, Philadelphia: Elsevier Saunders, 2012.
4. Faj, Z. Suvremena fizika, Pregled povijesti fizike; Osijek : Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Pedagoški fakultet, 1999.
5. Marie Curie – prva žena dobitnica Nobelove nagrade (Dostupno: 19.6.2018.)
<https://www.skolskiportal.hr/clanak/2680-marie-curie-prva-zena-dobitnica-nobelove-nagrade/>
6. Dželalija, M. Ionizirajuće zračenje u biosferi, Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet, 2005.
7. Guide to the Nobel Prize, 2014. Subatomic particle (Dostupno 19.7.2018.)
<https://www.slideshare.net/asober/feynman-diagrams>
8. Augerova elektronska spektroskopija// Hrvatska enciklopedija online, (Dostupno 26.10. 2018.) <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=4588>
9. Radioaktivnost // Hrvatska enciklopedija online, (Dostupno 26.10. 2018.)
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=51474>
10. Syed, A. N. Physics and Engineering of Radiation Detection 1ST ED., Queens University 2007.
11. Rajan, G.; Izewska, J. Radiation monitoring instruments // Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students, Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005. 101.-121.
12. Gonçalves, J. A. C. Pesquisas, propriedades e aplicações de detectores de faísca em problemas de física nuclear e de energia atômica, Sao Paulo, 1993.

13. Bastos, R. O. Manual de atividade pedagógica teóricoprática de física nuclear – detecção da radiação nuclear para o ensino médio. Universidade estadual do centro oeste, 2017.
14. Što je Arduino? (Dostupno: 19.6.2018.)
<https://e-radionica.com/hr/blog/2015/10/08/sto-je-arduino-i-croduino/>
15. Dresto, A. B. Radioaktivnost, primjena u medicini, (Dostupno: 15.5.2018.)
https://www.fzsri.uniri.hr/files/FAKULTET/KATEDRE/Katedra_temeljne/Microsoft%20Word%20-%20Radioaktivnost_Primjena%20u%20medicini_povjerenstvo_Z.pdf
16. Zakon o zaštiti od ionizirajućeg zračenja i sigurnosti izvora ionizirajućeg zračenja (Dostupno: 17.5.2018.) https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2006_06_64_1544.html
17. DIY Alpha Particle Spark Detector (Dostupno: 19.6.2018.)
https://www.imagesco.com/articles/geiger/alpha_particle_spark_detector_p1.html
18. Arduino - sound sensor (with led) (Dostupno: 19.6.2018.)
<https://www.instructables.com/id/Arduino-Sound-Sensor-with-LED/>

14. Životopis

Josip Živković rođen je 1.8.1994. godine u Vinkovcima, Republika Hrvatska. Osnovnu školu je završio u Kostrču i Tolisi, Općina Orašje, Republika Bosna i Hercegovina. Po završetku osnovne škole upisao je Opću gimnaziju u Orašju. Nakon srednje škole upisao se na Preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Trenutno pohađa Sveučilišni diplomski studiju fizike i informatike na Odjelu za fiziku u Osijeku.